干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

河西内陆河流域水生态安全评价研究

戴文渊[1]， 陈年来[1]， 李金霞[1]， 张 芮[2]

（1. 甘肃农业大学资源与环境学院，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃农业大学水利水电工程学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：水安全评价相关研究已有较多成果，但绝大多数采用P-S-R（压力-状态-响应）及其扩展模型，且评价指标体系的优化校准几乎从未提及。本文将W-SENCE（与水有关的社会-经济-自然复合生态系统）模型引入水生态安全评价领域，从水生态安全的自然属性和社会经济属性方面构建水生态安全评价指标体系，结合模糊系统分析及改进生态位理论对指标体系分析、优化，以优化后指标体系对河西内陆河流域2014—2017年的水生态安全状况模糊综合评价。结果表明：指标B3（工业增加值）、B13（河川基流量）、B17（产水系数）、B20（引水量）的改进生态位宽度值相对最大，对指标体系影响相对最小，建立优化指标体系时剔除。优化后指标体系中，指标C11（多年平均降水量）、C16（蓄水量）、C17（地表水源供应量）、C18（地下水资源供应量）、C24（生态环境用水量）、C29（节水灌溉面积）权重最大，为流域水生态安全主要影响因子，表明加大水利基础设施投入，发展节水灌溉农业，保护生态环境是提高内陆河流域水生态安全状况的最有效措施。2014—2017年，黑河流域水生态安全状况持续好转，石羊河和疏勒河流域水生态安全状况均呈持续恶化趋势，应作为重点治理区域，内陆河流域水生态安全状况"整体改善，局部恶化"趋势仍在持续。结果可为河西内陆河流域水行政、生态环境管理、生态风险决策提供理论支持。

关 键 词：改进生态位；模糊系统分析；水生态安全；河西内陆河

文章编号：

水是生命之源，生态之基，是生态关系的脉络和神经，自然界出现的一切生态环境都和水有关[1]。流域水生态安全事关人类健康和经济社会稳定，随着生态文明理念深入发展，水利部提出建设水生态文明，从生态视角看待水问题，水生态安全是由自然生态安全、经济生态安全和社会生态安全组成的复合人工生态安全系统，是生态安全的组成部分，也是水安全概念的深化和延伸。

近年来，国内外学者在水生态安全评价方面已初步建立了一些模型和方法[2-4]。20世纪80、90年代美国学者从生态脆弱性和生态健康理论方面对生态系统安全问题进行理论探讨[5]，Schneider和Kay从生态系统结构和功能方面研究水生态环境，Constanza、Ulanowicz、Karr等分别将生态系统健康指数、网络优势指数、生物完整性指标等引入生态系统评价指标体系[6]，Simboura选用不同生物指标评价水生态环境状况，Angel Borja运用不同水生态环境评价方法相互校准[7]，国外对水安全评价相关研究主要集中在理论概念、评价指标体系的指标指数开发、指标体系验证校准方面。在国内，上世纪80年代，李佩成提出水生态系统概念，指出水问题要从生态学视角去研究，用生态学方法去解决[8-9]。严立冬着重从系统安全角度阐释城市水生态安全问题[10]，黄昌硕从国家层面探讨中国水资源及水生态安全问题[11]，尹文涛[12]、王增铮[13]分别从生态格局、虚拟地理环境平台方面研究水生态安全问题，张晓岚、陈广、李梦娣等[14-20]分别对漳卫南运河流域、三峡库区、河南省等区域进行水生态安全评价。相关评价多采用多指标评价体系，且指标体系内容不断丰富和扩展[21-23]，但国内外相关研究基本

收稿日期：2020-01-19； **修订日期**：2020-12-19

基金项目：甘肃省重点研发计划（18YF1FA081）

作者简介：戴文渊（1989-），男，博士研究生，研究方向为基础生态学. E-mail: 13993181879@163.com

通讯作者：陈年来（1962-），男，博士生导师，研究方向为基础生态学. E-mail: chennl@gsau.edu.cn

都是基于PSR(压力-状态-响应)及其扩展模型,以人为选择方式分类,虽能清楚表明系统中的因果关系,但指标选取有赖于主观判断和经验,缺乏对系统结构和决策过程的有效把握,对复杂反馈系统的处理效果不好[24-25],且均未涉及指标体系优化问题。

SENCE(社会-经济-自然复合生态系统)模型[2,24,26]将生态安全看作是经济、社会和生态环境各系统互相耦合形成的统一体,在满足科学性与系统性的同时,能客观反应流域水生态安全状况和问题。W-SENCE概念框架(经济-社会-自然复合水生态系统)是在确保水生态系统稳定前提下,坚持以人为本,由与水有关的自然条件、人类社会和经济活动共同组成的生态功能统一体,是新的水生态安全研究模型,具有积极的现实指导意义。因此,本文以W-SENCE模型为基础,从水生态安全的社会经济属性和自然属性出发,构建流域水生态安全评价体系。水生态安全评价属于系统性评价,要找到要素之间确切关系往往不可能[27],借助模糊数学方法在解决此类问题上的优势,运用模糊系统分析法确定评价指标权重;利用改进生态位理论在确定优先调控指标上的优势,对评价指标体系进行优化;用优化后指标体系对河西内陆河流域(疏勒河、黑河、石羊河)2014—2017年的水生态安全状况模糊综合评价,以期为流域水生态安全评价提供新的方法途径,为内陆河流域高质量发展提供新思路,指导生态保护工作实践。

1 研究区概况

甘肃河西自东向西有疏勒河、黑河和石羊河三大内陆河。从古至今,河西走廊在西部政治、经济、军事、文化方面承担重要责任,如今内陆河流域普遍存在严重生态危机,生态问题较突出。根据甘肃省气象局资料显示,三大内陆河流域均存在较严重生态退化问题,主要表现在植被覆盖度减少,部分地区生态问题激化。

(1) 疏勒河水系。位于走廊西端,南有阿尔金山东段、祁连山西段的高山,山前有一列东西走向的剥蚀石质低山;北有马鬃山,中部走廊为疏勒河中游绿洲和党河下游的敦煌绿洲,疏勒河下游则为盐碱滩,绿洲外围有面积较广的戈壁,间有沙丘分布。

(2) 黑河水系。东西介于大黄山和嘉峪关之间,大部分为砾质荒漠和沙砾质荒漠,北缘多沙丘分布,张掖、临泽、高台之间及酒泉一带形成大面积绿洲,是河西重要农业区。

(3) 石羊河水系。位于走廊东段,南面祁连山前山地区为黄土梁峁地貌及山麓洪积冲积扇,北部以沙砾荒漠为主,并有剥蚀石质山地和残丘,东部为腾格里沙漠,中部是武威盆地。

河西走廊位于我国地理版图中间地带,青藏高原和内蒙古高原间凹陷地带,这里西伯利亚寒流畅通无阻,河西走廊内陆河流域生态的好与坏,直接影响我国总体的生态状况,因此开展河西走廊内陆河流域水生态安全评价研究具有重要的现实意义。

2 研究方法

水生态安全评价研究是一个多学科交叉领域,评价指标体系构建较复杂,不同学者有不同的见解,缺少对评价指标体系的分析优化方面研究[28-34]。由于水生态安全评价是一个带有模糊性、综合性的多指标系统评价过程,因而利用模糊数学方法在解决此类问题中理论上和实际操作上的显著优势,运用模糊系统分析法确定指标权重;运用改进生态位理论在分析地区水生态安全优先调控指标上的显著优势,确定水生态安全评价指标中优先调控指标[11,14],优化评价指标体系;运用优化后的评价指标体系对内陆河流域水生态安全状况模糊综合评价。

2.1 基于W-SENCE的水生态安全评价指标体系构建

本文遵循水生态安全评价指标体系构建中科学性、动态性、系统性、开放性、层次性和区域性原则,结合理论优选、实践经验、频次分析筛选水生态安全评价指标。根据甘肃河西三大内陆河流域的水生态安全现实问题(过度放牧、水资源利用效率低,浪费严重、水利设施落后等),选取相对应的评价指标(牲畜头数、蓄水量、引水量等)。结合实践分析,以W-SENCE模型为基础,以水生态文明、山水林田湖草为生命共同体系统治理理念为指导,从水生态安全的社会经济属性和自然属性(资源属性、环境属性、生态属性、灾害属性)出发,构建水生态安全初步评价指标体系(表1)。

2.2 水生态安全评价指标体系模糊系统分析

2.2.1 建立模糊矩阵 R 将标准化的数据x_{ik}和x_{jk}代入式(1)。

$$\gamma_{ij}=\sum_{k=1}^{m}x_{ik}\times x_{jk},\ (i\neq j) \tag{1}$$

表1 基于W-SENCE模型水生态安全初步评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of water ecological security based on W-SENCE model

水生态安全概念框架	属性	评价指标	内陆河流域优选指标
自然复合生态系统(NCE)	资源属性	河川基流量、地表水资源量、水资源总量、平均水量、年均降水量	牲畜头数、蓄水量、引水量
	环境属性	生态环境用水量、流域计算面积、产水系数、产水模数、径流深	
	生态属性	节水灌溉面积、农田灌溉水量、林木渔畜用水量、工业用水量、建筑业用水量、居民生活用水量	
	灾害属性	城镇居民生活废污水量、废污水排放量、达标排放量	
社会(S)	人文属性	人口、农田有效溉面积万亩、农田实灌面积	
经济(E)	经济属性	GDP、工业增加值、地表水源供应量、地下水源供应量、粮食产量	

$$\gamma_{ij}=1,\ (i=j) \quad (2)$$

式中：x_{ik} 为第 i 流域第 k 项指标(水生态安全评价指标)的无量纲参数；x_{jk} 为第 j 流域第 k 项指标的无量纲参数；m 为样本(流域)总数；由此构造的矩阵 $(\gamma_{ij})_{n\times n}$ 称为模糊矩阵。

2.2.2 建立模糊相关矩阵 *U*

$$U=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad a_{ij}\in[0,1] \quad (3)$$

式中：a_{ij} 为矩阵元，$i=1,2,\cdots,i$。

2.2.3 模糊相关程度分析 根据所建立的模糊相关矩阵，以最大矩阵元作为置信水平 λ，求得各指标的置信水平；根据模糊矩阵最大矩阵元定理，由公式(4)得到指标权重：

$$W_i=\frac{1-\lambda_i}{\sum_{i=1}^{n}(1-\lambda_i)} \quad (4)$$

式中：W_i 为第 i 指标权重；λ_i 为第 i 指标置信水平；$i=1,2,\cdots,n$。

2.3 水生态安全评价指标体系优化

Hutchinson认为，生态位是一个 n 维超体积变量，它的 n 个坐标轴包括决定某一物种生存状态的关键物理环境因子。生态位计算简单、可操作性强，已成为众多理论与野外研究基础，被广泛应用于栖息地选择、物种时空分布动态与保护、群落演化等方面。本文采用应用最广泛的Levins生态位宽度模型，一个流域上某一资源轴(水生态安全评价指标)的生态位宽度越大，说明该指标对流域水生态安全影响越小，不是控制性指标。反之，则需考虑优先调控。将模糊数学中的隶属度概念引入生态位的计算中，在计算生态位宽度之前，将各资源轴划分为不同的梯度，计算各典型流域属于各资源轴不同梯度的概率，将Levins生态位宽度模型改进为公式(5)，运用公式(5)计算生态位宽度。

$$B_i=\frac{1}{\sum_{j=1}^{R}(P_{ij}\gamma_{ij})^2} \quad (5)$$

式中：B_i 为流域的生态位宽度；P_{ij} 为流域 i 在梯度 j 上的数量占二者总数量的比例(%)；R 为梯度的等级总数；γ_{ij} 为流域 i 在梯度 j 上的隶属度，取值范围为[0,1]。

2.4 模糊综合评价

用已经建立优化后的水生态安全评价指标体系，进行水生态安全模糊综合评价，得到的评价向量是因素权重向量与模糊矩阵合成的结果。即：

$$Y=R\times X=(y_1,y_2,\ldots,y_n)^{\mathrm{T}} \quad (6)$$

式中：Y 为评价向量($y_1,y_2,\ldots,y_n$ 为各年综合评价指数)；R 为标准化的评价指标矩阵(标准化数据组成的矩阵)；X 为评价权重向量(评价指标权重组成的向量)；T为向量转置符号。

3 数据来源与处理

3.1 数据来源

本文水资源、水环境相关数据主要来源于2014—2017年甘肃省水文局相关统计资料及《甘肃省水资源公报》，与水相关的社会经济数据来源于《甘肃省统计年鉴》《中国水土保持公报》《中国环境统计年鉴》《中国林业统计年鉴》(2014—2017年)，部分水管理类数据来源于甘肃省政府水利部门公开信息及年度报告。

3.2 数据标准化处理

在水生态安全初步评价指标体系建立后,需要对指标数据标准化处理,按统一的"标准"进行调整,消除由于单位不同造成的影响。本实证研究中以2017年数据为例,指标数据标准化处理如下:

对于越大越安全的指标:

$$y_{ij}=(x_{ij}-\min x_i)/(\max x_i-\min x_i) \quad (7)$$

对于越小越安全的指标:

$$y_{ij}=(\max x_i-x_{ij})/(\max x_i-\min x_i) \quad (8)$$

式中: y_{ij} 为第 i 行 j 列标准化数据; $\max x_i$ 为第 i 行最大值; $\min x_i$ 为第 i 行最小值。

根据公式(7)、(8)对河西走廊三大内陆河流域水生态安全评价指标数据标准化处理,结果如表2所示。

3.3 基于改进生态位理论的水生态安全优先调控指标确定

应用模糊数学中隶属度的概念,运用改进生态位理论,以33个评价指标为资源轴,计算其不同梯度上的隶属度及生态位宽度,采用隶属函数[35]计算各流域的水生态安全评价指标隶属度,根据公式(5)计算河西走廊三大内陆河流域在33个资源轴上的生态位宽度,各流域及指标的生态位宽度值如表3所示。

指标B3(工业增加值)、B13(河川基流量)、B17(产水系数)、B20(引水量)的生态位宽度值相对最大,指标对水生态安全状况的影响相对最小,因此运用改进生态位理论在优化评价指标体系过程中将这4个指标剔除,得到了优化后评价指标体系(表4)。

3.4 模糊系统分析

根据所建立的模糊相关矩阵以最大矩阵元作为置信水平,求得各指标的置信水平。根据公式(4)计算各评价指标的指标权重,得到优化后水生态安全评价指标体系29个指标的指标权重,如表5所示。

3.5 模糊综合评价

对2014—2017年河西走廊三大内陆河流域(疏勒河、黑河、石羊河)的水生态安全状况进行模糊综合评价,根据表2(数据标准化)和表5(指标权重),由公式(6)计算得到河西走廊三大内陆河流域连续4 a的水生态安全状况评价向量:

$$Y_{2014}=(0.268,\ 0.480,\ 0.534)^{\mathrm{T}}$$
$$Y_{2015}=(0.294,\ 0.475,\ 0.487)^{\mathrm{T}}$$
$$Y_{2016}=(0.132,\ 0.401,\ 0.629)^{\mathrm{T}}$$
$$Y_{2017}=(0.223,\ 0.294,\ 0.658)^{\mathrm{T}}$$

表2 水生态安全评价指标标准化

Tab. 2 Standardization of evaluation indices of water ecological security

指标编号	评价指标	疏勒河	黑河	石羊河	指标编号	评价指标	疏勒河	黑河	石羊河
B1	人口	0.9013	0.6164	0.5834	B18	产水模数	0.0238	0.1665	0.1732
B2	GDP	0.8104	0.5354	0.6700	B19	蓄水量	0.9253	0.9630	1.0000
B3	工业增加值	0.6805	0.3207	0.5039	B20	引水量	0.0427	1.0000	0.0567
B4	耕地面积	0.8280	0.5565	0.6224	B21	地表水源供应量	0.3996	1.0000	0.5354
B5	农田有效溉面积	0.6818	0.0000	0.2713	B22	地下水源供应量	0.3740	1.0000	0.7816
B6	农田实灌面积	0.6716	0.0000	0.3593	B23	农田灌溉水量	0.5960	0.0000	0.4041
B7	粮食产量	0.9609	0.3548	0.4323	B24	林木渔畜用水量	0.7471	0.0000	0.6078
B8	牲畜头数	0.6713	0.0000	0.1583	B25	工业用水量	0.6650	0.1997	0.2125
B9	河流年均水量	0.7096	0.4429	0.3744	B26	建筑业用水量	0.8485	0.6258	0.7944
B10	流域计算面积	0.0000	0.6515	0.7614	B27	居民生活用水量	0.8995	0.5693	0.6184
B11	径流深	0.0275	0.1553	0.1468	B28	生态环境用水量	0.6728	1.0000	0.4616
B12	年均降水量	0.2060	0.2071	0.1489	B29	经济社会用水量	0.6073	0.0000	0.3996
B13	河川基流量	0.1055	0.2596	0.1749	B30	城镇居民生活废污水产生量	0.9570	0.6659	0.4991
B14	地表水资源量	0.2697	0.3151	0.2055	B31	废污水排放量	0.7441	0.4057	0.4511
B15	地下水资源量	0.4898	0.8661	0.4590	B32	达标排放量	0.1327	0.2215	0.2526
B16	水资源总量	0.2745	0.3415	0.2415	B33	节水灌溉面积	0.4058	0.8388	1.0000
B17	产水系数	0.5833	0.6667	0.4167					

表3　三大内陆河流域在33个资源轴上的生态位宽度

Tab. 3　Niche widths of flow segments on the 33 resource axes

项目编号	疏勒河	黑河	石羊河	指标生态位宽度均值	项目编号	疏勒河	黑河	石羊河	指标生态位宽度均值	项目编号	疏勒河	黑河	石羊河	指标生态位宽度均值
B1	1.0000	9.9397	11.1150	9.2333	B12	8.6641	8.6075	11.1105	9.4607	B23	10.6027	1.0000	9.6942	7.09896
B2	1.0000	14.2330	8.8119	2.3553	B13	16.3368	7.1427	9.3333	10.9376	B24	7.6464	1.0000	10.1973	6.28125
B3	8.6495	7.0969	18.1197	9.4565	B14	7.0540	7.0690	8.6903	7.60441	B25	8.8934	7.8576	8.3499	8.36696
B4	1.0000	12.5780	9.7762	10.2856	B15	7.9762	1.0000	8.3138	5.7633	B26	1.0000	9.6890	1.0000	3.89631
B5	8.6300	1.0000	7.0439	10.1355	B16	7.0267	7.1877	7.4282	7.2142	B27	1.0000	11.8091	9.8838	7.56431
B6	8.7865	1.0000	12.4947	8.1474	B17	11.1195	8.8654	9.2430	9.7426	B28	8.7676	1.0000	8.2776	6.0154
B7	1.0000	12.9321	8.8119	7.0386	B18	1.0000	9.8642	9.4386	6.7676	B29	10.2132	1.0000	9.8823	7.03185
B8	8.7912	1.0000	10.4161	7.3212	B19	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	B30	1.0000	8.8785	7.9010	5.92650
B9	8.2293	8.5833	11.2789	9.4928	B20	1.0000	1.0000	39.8644	13.9548	B31	7.6980	9.6310	8.4357	8.58820
B10	1.0000	9.1315	1.0000	8.1031	B21	9.8823	1.0000	14.2330	8.37178	B32	12.5530	7.9882	7.2322	9.25779
B11	1.0000	10.6294	11.2774	1.0000	B22	11.3067	1.0000	1.0000	4.43558	B33	9.6271	1.0000	1.0000	3.87569
生态位宽度平均值	6.3774	6.1428	9.4441		生态位宽度均值	6.3774	6.1428	9.4441		生态位宽度均值	6.3774	6.1428	9.4441	

表4　优化后评价指标体系

Tab. 4　Optimized evaluation index system

指标编号	评价指标	指标编号	评价指标	指标编号	评价指标	指标编号	评价指标
C1	人口	C9	流域计算面积	C17	地表水源供应量	C25	经济社会用水量
C2	GDP	C10	径流深	C18	地下水源供应量	C26	城镇居民生活废污水量
C3	耕地面积	C11	年均降水量	C19	农田灌溉水量	C27	废污水排放量
C4	农田有效溉面积	C12	地表水资源量	C20	林木渔畜用水量	C28	达标排放量
C5	农田实灌面积	C13	地下水资源量	C21	工业用水量	C29	节水灌溉面积
C6	粮食产量	C14	水资源总量	C22	建筑业用水量		
C7	牲畜	C15	产水模数	C23	居民生活用水量		
C8	河流年均水量	C16	蓄水量	C24	生态环境用水量		

表5　优化后的评价指标权重

Tab. 5　Weight of the optimized evaluation index

评价指标及编号	指标权重	指标体系编号	指标权重	指标体系编号	指标权重
C1	0.0134	C11	0.0578	C21	0.0111
C2	0.0068	C12	0.0571	C22	0.0047
C3	0.0111	C13	0.0549	C23	0.0100
C4	0.0023	C14	0.0568	C24	0.0599
C5	0.0018	C15	0.0432	C25	0.0021
C6	0.0128	C16	0.0618	C26	0.0077
C7	0.0126	C17	0.0612	C27	0.0081
C8	0.0476	C18	0.0633	C28	0.0573
C9	0.0035	C19	0.0007	C29	0.0578
C10	0.0434	C20	0.0001		

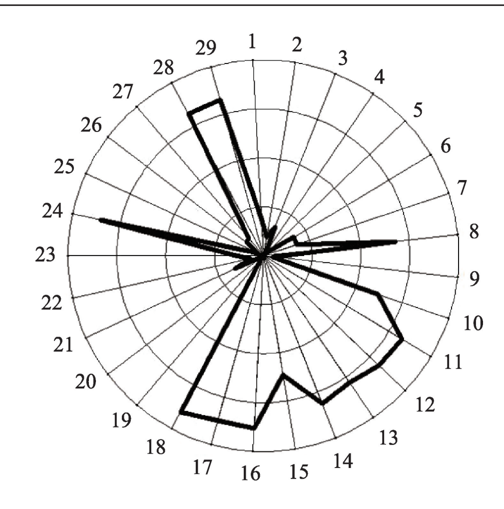
4　结果与分析

4.1　改进生态位理论优化评价指标体系

根据水生态安全评价指标体系中各资源轴(水生态安全评价指标)的平均生态位宽度可以看出，指标B3(工业增加值)、B13(河川基流量)、B17(产水系数)、B20(引水量)的生态位宽度值相对最大，分别为9.457、10.938、9.743、13.955。表明以上指标对当前水生态安全评价指标体系影响最小，对河西走廊三大内陆河流域的水生态安全状况影响较小，为次要影响因子，因而在最终优化评价指标体系中将这几个指标剔除。疏勒河、黑河、石羊河的平均生态位宽度值分别为：6.3774、6.1428、9.4441，总体上三大内陆河流域生态位宽度值接近，表明在当前指标体系下适应性接近，需要根据实际评价指标状况进行针对性调控。

4.2　模糊系统分析确定最主要影响因子

通过模糊系统分析(图1)，指标C11(年均降水量)、C16(蓄水量)、C17(地表水源供应量)、C18(地下水源供应量)、C24(生态环境用水量)、C29(节水



注：1~29表示优化后水生态安全评价指标体系C1~C29。

图1 评价指标相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of evaluation indices

灌溉面积)的指标权重相对最大，累计指标权重达36.18%，为影响河西走廊三大内陆河流域水生态安全状况的最主要影响因子，指标C5(农田实灌面积)、C19(农田灌溉水量)、C20(林木渔畜用水量)、C25(经济社会用水量)指标权重小，累计指标权重为0.46%，为次要影响因子。

4.3 甘肃境内流域水生态安全状况分析

参考前人研究成果[36-40]，参照2016年水利部等部门联合发布的《江河生态安全调查与评估技术指南》，2013年环境保护部发布的《流域生态健康评估技术指南》，将评价结果分为3级：$y≥0.45$ 为I级(安全区)，$0.3≤y<0.45$ 为II级(中等安全区)，$y<0.3$ 为III级(不安全区)。河西走廊三大内陆河流域水生态安全状况的模糊综合评价结果(图2)显示：黑河流域连续4 a水生态安全状况处于Ⅰ级(安全)区，且逐年向好；石羊河流域2014、2015年水生态安全状况处于Ⅰ级(安全)区，2016年处于Ⅱ级(中等)区，

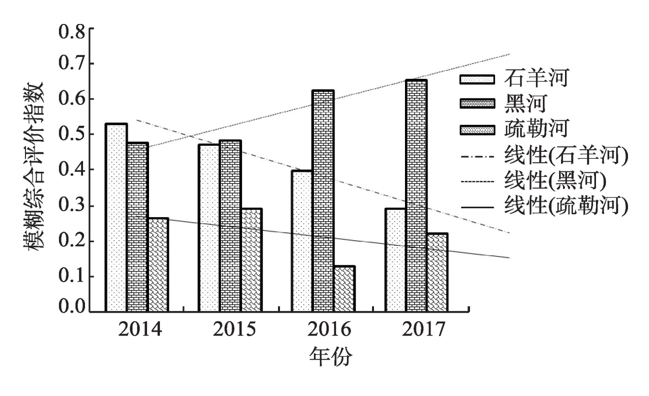


图2 模糊综合评价指数

Fig. 2 Fuzzy comprehensive evaluation index

2017年处于Ⅲ级(不安全)区，水生态安全状况线性预测呈下降趋势，需要予以关注；而疏勒河流域连续4 a水生态安全状况均处于Ⅲ级(不安全)区，模糊综合评价指数在0.2左右徘徊，线性预测呈缓慢下降趋势，整体水生态安全状况最差。

5 结 论

本研究基于流域与水有关的经济、社会、自然复合系统(W-SENCE)的交互关系，结合水安全评价相关研究成果[29-33]，构建流域水生态安全评价指标体系，运用模糊系统分析及改进生态位理论优化评价指标体系，运用优化后评价指标体系对甘肃河西三大内陆河流域水生态安全状况模糊综合评价，结果表明：

(1) 2014—2017年，黑河流域模糊综合评价指数均在0.45以上，其线性预测变化呈逐年上升趋势，水生态安全状况持续向好，相对最好。石羊河流域模糊综合评价指数由2014年的0.5逐渐下降到2017年的0.3以下，由安全区逐渐迈向不安全区，线性预测变化趋势持续下降。疏勒河模糊综合评价指数在0.2左右徘徊，同时线性预测呈缓慢下降趋势，水生态安全状况相对最差。因此今后需重点加大对石羊河、疏勒河水生态安全治理力度，避免形势恶化，尤其要将疏勒河流域作为内陆河流域治理重点。这与当前三大内陆河流域系列生态恶化事件反应出的生态环境破坏现状相吻合，通过模糊综合评价得到了较客观的评价结果。

(2) 通过模糊系统分析，指标年均降水量、蓄水量、地表水源供应量、地下水资源供应量、生态环境用水量、节水灌溉面积的指标权重相对最大，分别为：0.0578、0.0618、0.0612、0.0633、0.0599、0.0578，累计指标权重达36.18%，对流域的水生态安全状况影响最大，表明内陆河流域通过蓄水等措施增加供水量，加大生态环境用水，提高农业节水对提高水生态安全具有重要作用。因此，加大基础水利设施投入，发展节水灌溉农业，保护生态环境是当前提高河西内陆河流域水生态安全状况的最有效措施，凸显了内陆河流域经济社会发展受水资源制约大，发展节水灌溉农业措施也与现实需要完全相符。

(3) 根据改进生态位理论优化水生态安全初步评价指标体系，工业增加值、河川基流量、产水系

数、引水量这4个指标的生态位宽度值相对最大，分别为18.1、10.9、9.7、14.0，其对河西走廊三大内陆河流域的水生态安全状况影响不大，予以剔除，得到优化后29指标构成的评价指标体系（表5）。表明引水量、基流量、工业增加值对内陆河流域水生态安全影响不大，这可能由于各流域上述指标差异不明显，不是限制性因子。

6 讨 论

本文基于流域与水有关的经济、社会、自然复合系统（W-SENCE）交互关系，从水的基本属性出发，构建流域水生态安全结构模型，和以往研究相比[16-20,27]，克服了常规PSR模型缺乏对系统结构和决策过程有效把握的缺点，较全面得涵盖了流域水生态安全状况的主要影响因子。采用改进生态位理论优化评价指标体系，剔除4个影响流域水生态安全状况的次要影响因子，得到了优化评价指标体系。采用模糊系统分析的方法确定评价指标体系权重，克服了以往研究根据层次分析法和专家打分法获得，具有较大主观性的缺点。模糊系统分析结果表明，加大基础水利设施投入，发展节水灌溉农业，保护生态环境是当前提高河西内陆河流域水生态安全状况的最有效措施，这为流域水行政管理及其水资源规划提供借鉴，可为黄河、长江流域的高质量发展提供参考。通过模糊综合评价，得到三大内陆河流域2014—2017年的水生态安全状况模糊综合评价结果，从水生态安全评价结果年际变化趋势来看，石羊河和疏勒河流域水生态安全状况有所恶化，应作为今后内陆河流域重点治理区域，河西内陆河流域"整体改善，局部恶化"的趋势还没有根本扭转，评价结果基本符合流域当前实际状况，这也验证了该评价方法的科学性和可行性。流域水生态安全评价是生态安全研究的重要内容，是水生态文明建设的内在需要，提升流域水生态安全状况，做好流域水生态风险防控，今后需在水生态安全预警方面进行更多探索。

参考文献（References）

[1] 冯国章. 水事活动对区域水文生态系统的影响[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 71-72. [Feng Guozhang. Impacts of water-related human activities on regional hydro-ecosystems[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 71-72.]

[2] 徐斌, 申恒伦, 胡长伟, 等. 基于DPSIR模型和改进的群组AHP法的岸堤水库水生态安全评价[J]. 人民珠江, 2018, 39(1): 40-43. [Xu Bin, Shen Henglun, Hu Changwei, et al. Evaluation of water eco-security of Andi reservoir based on DPSIR model and improved group AHP method[J]. Pearl River, 2018, 39(1): 40-43.]

[3] 张凤太, 苏维词. 基于均方差-TOPSIS模型的贵州水生态安全评价研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(9): 88-92, 103. [Zhang Fengtai, Su Weici. Ecological security of water in Guizhou based on mean square deviation-TOPSIS model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(9): 88-92, 103.]

[4] 陈华伟, 黄继文, 张欣, 等. 基于DPSIR概念框架的水生态安全动态评价[J]. 人民黄河, 2013, 35(9): 34-37, 45. [Chen Huawei, Huang Jiwen, Zhang Xin, et al. Dynamic evaluation of water ecological security based on DPSIR concept framework[J]. Yellow River, 2013, 35(9): 34-37, 45.]

[5] Xu F L, Jrgensen S E, Tao S. Ecological indicators for assessing freshwater ecosystem health[J]. Ecological Modelling, 1999, 166: 77-106.

[6] Angel B, Josefson A B, Alison M. An approach to the inter-calibration of benthic-ecological status assessment in the north Atlantic eco-region, according to the European water framework directive[J]. Marine Pollution Bulletin, 2007, 55: 42-52.

[7] Lepisto L, Holopainen A L, Vuoristo H. Type-specific and indicator taxa of phytoplankton as a quality criterion for assessing the eco-logical status of Finnish boreal lakes[J]. Limnologica, 2004, 34: 236-248.

[8] 李佩成, 冯国章. 论干旱半干旱地区水资源可持续供给原则及节水型社会的建立[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(2): 1-2. [Li Peicheng, Feng Guozhang. On the principle of sustainable supply of water resources in arid and semi-arid areas and the establishment of water-saving society[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 1997, 15(2): 1-2.]

[9] 李佩成. 试论干旱[M]. 北京: 科学出版社, 1985. [Li Peicheng. Try to talk about the drought[M]. Beijing: Science Press, 1985.]

[10] 严立冬, 岳德军, 孟慧君. 城市化进程中的水生态安全问题探讨[J]. 中国地质大学学报, 2007, 7(1): 57-62. [Yan Lidong, Yue Dejun, Meng Huijun. Study on the safety of water zoology during the urbanization process[J]. Journal of China University of Geosciences, 2007, 7(1): 57-62.]

[11] 黄昌硕, 耿雷华, 王立群, 等. 中国水资源及水生态安全评价[J]. 人民黄河, 2010(3): 14-16, 140. [Huang Changshuo, Geng Leihua, Wang Liqun, et al. Evaluation on China water resources and water ecological security[J]. Yellow River, 2010(3): 14-16, 140.]

[12] 尹文涛. 基于水生态安全影响的沿海低地城市岸线利用规划研究——以天津滨海新区为例[J]. 天津: 天津大学, 2015. [Yin Wentao. Research of shoreline using and planning in coastal low-

land city based on water ecological security: A case study in Tianjin Binhai new area[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.]

[13] 王增铮. 面向水生态安全遥感监测的虚拟地理环境平台研究.[D]. 南昌: 江西师范大学, 2017. [Wang Zengzheng. Research on virtual geographical environment platform for remote sensing monitoring of water ecological security[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2017.]

[14] 张晓岚, 刘昌明, 赵长森, 等. 改进生态位理论用于水生态安全优先调控[J]. 环境科学研究, 2014, 27(10): 1103–1109. [Zhang Xiaolan, Liu Changming, Zhao Changsen, et al. Study on priority regulation for water ecological security based on niche theory[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(10): 1103–1109.]

[15] 田丰收, 刘新平, 原伟鹏. 新疆和田地区耕地面源污染生态风险评价[J]. 干旱区地理, 2019, 42(2): 295–304. [Tian Fengshou, Liu Xinping, Yuan Weipeng. Ecological risk assessment of farmland non-point source pollution in Hotan Prefecture, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(2): 295–304.]

[16] 魏冉. 辽宁省辽河流域水生态功能三级区水生态安全评价[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2013. [Wei Ran. Assessment of water ecological security based on the third level aquatic ecoregion of Liao River Basin[D]. Shenyang: Liaoning University, 2013.]

[17] 陈广. 基于DPSIR模型的三峡库区水生态安全评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015. [Chen Guang. Water ecological safety assessment of Three Gorges Reservoir area based on DPSIR model [J]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.]

[18] 张晓岚, 刘昌明, 门宝辉, 等. 漳卫南运河流域水生态安全指标体系构建及评价[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49 (6): 626–630. [Zhang Xiaolan, Liu Changming, Meng Baohui, et al. Establishing indicator system and evaluating ecological security in Zhangweinan River Basin[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2013, 49(6): 626–630.

[19] 李梦娣, 范俊韬, 孔维静, 等. 河流山区段水生态安全评估——以太子河为例[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2685–2694. [Li Mengdi, Fan Juntao, Kong Weijing, et al. Assessment of aquatic ecological security for mountainous rivers: A case study in the Taizi River Basin, northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(8): 2685–2694.]

[20] 张满满, 于鲁冀, 张慧, 等. 基于PSR模型的河南省水生态安全综合评价研究[J]. 生态科学, 2017, 36(5): 49–54. [Zhang Manman, Yu Luji, Zhang Hui, et al. Assessment of the ecological security of water environment in Henan based on PSR model[J]. Ecological Science, 2017, 36(5): 49–54.]

[21] Romero J, Marthez-Crego B, Alcoverro T. A multivariate index based on the seagrass *Posidonia oceanica* (POMI) to assess ecological status of coastal waters under the water framework directive (WFD)[J]. Marine Pollution Bulletin, 2007, 55: 196–204.]

[22] Simboura N, Reizopoulou S. A comparative approach of assessing ecological status in two coastal areas of eastern Mediterranean[J]. Ecological Indicators, 2007, 7: 455–468.]

[23] Chainho P, Costa J L, Chaves M L. Influence of seasonal variability in benthic invertebrate community structure on the use of biotic indices to assess the ecological status of a Portuguese estuary[J]. Marine Pollution Bulletin, 2007, 54: 1586 –1597.]

[24] 王影. 生态安全的动态评价及多层次分析[D]. 天津: 天津大学, 2015. [Wang Ying. Dynamic assessment and comprehensive analysis of ecological safety[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.]

[25] 李天霄, 付强, 彭胜民. 基于DPSIR模型的水土资源承载力评价[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(8): 128–134. [Li Tianxiao, Fu Qiang, Peng Shengmin. Evaluation of water and soil resources carrying capacity based on DPSIR frame work[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2012, 43(8): 128–134.]

[26] 张小虎, 雷国平, 袁磊, 等. 黑龙江省土地生态安全评价[J]. 中国人口资源与环境, 2009, 11(1): 88–93. [Zhang Xiaohu, Lei Guoping, Yuan Lei, et al. Evaluation on ecological security of land based on entropy weight and matter-element model: A case study of Heilongjiang Province[J]. Population Resources and Environment, 2009, 11(1): 88–93.]

[27] 李辉. 生态安全评价理论体系研究与实例分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2004. [Li Hui. Theoretical research on ecological security assessment system and case study analysis[D]. Northeastern University, 2004.]

[28] 陈伊多, 杨庆媛, 杨人豪, 等. 基于熵权物元模型的土地生态安全评价——重庆市江津区实证[J]. 干旱区地理, 2018, 41(1): 185–194. [Chen Yinduo, Yang Qingyuan, Yang Renghao, et al. Evaluaion of land ecological security based on entropy weighted matter-element model: A case of Jiangjin District, Chongqing[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(1): 185–194.]

[29] 戴文渊. 基于模糊综合评价的甘肃地区水生态安全评价指标体系研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016. [Dai Wenyuan. Research on ecology security index system in Gansu area based fuzzy comprehensive evaluation[D]. Lanzhou: Gansu agricultural University, 2016.]

[30] 戴文渊, 张芮, 成自勇, 等. 基于模糊系统分析的水生态安全评价研究——以北方四市为例[J]. 水利水电技术, 2015, 46(9): 23–26, 44. [Dai Wenyuan, Zhang Rui, Cheng Ziyong, et al. Fuzzy system analysis-based study on safety assessment of water ecology: Cases of four cities in north China[J]. Water Resources and Engineering, 2015, 46(9): 23–26, 44.]

[31] 戴文渊, 张芮, 成自勇, 等. 白银市水生态安全评价研究[J]. 水利水运工程学报, 2015(4): 92–97. [Dai Wenyuan, Zhang Rui, Cheng Ziyong, et al. Hydroecological safety evaluation for Baiyin City[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(4): 92–97.]

[32] 戴文渊, 张芮, 成自勇, 等. 基于模糊综合评价的兰州市水生态安全指标体系研究[J]. 干旱区研究, 2015, 32(4): 804–809. [Dai

Wenyuan, Zhang Rui, Cheng Ziyong, et al. Research on water ecological security index system in Lanzhou based fuzzy comprehensive evaluation[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(4): 804-809.]

[33] 戴文渊, 张芮, 成自勇, 等. 基于模糊系统分析的河西地区酿酒葡萄梅鹿辄的品质评价[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(9): 1659-1663. [Dai Wenyuan, Zhang Rui, Cheng Ziyong, et al. Quality assessment of wine grape merlot based on fuzzy system analysis in Hexi Region[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2015, 27(9): 1659-1663.]

[34] 曹丽娟, 张小平. 基于主成分分析的甘肃省水资源承载力评价[J]. 干旱区地理, 2017, 40(4): 906-912. [CAO Lijuan, ZHANG Xiaoping. Assessment of water resources carrying capacity in Gansu Province based on principal component analysis[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(4): 906-912.]

[35] 刘灵辉, 陈银蓉, 石伟伟. 基于模糊综合评价法的柳州市土地集约利用评价[J]. 广东土地科学, 2007, 6(3): 1-6. [Liu Linghui, Chen Yinrong, Shi Weiwei. Land intensive utilization evaluation on Liuzhou City based on fuzzy synthetic evaluation method[J]. Guangdong Land Science, 2007, 6(3): 1-6.]

[36] 靳春玲, 贡力. 基于PSR模型的城市水安全评价研究[J]. 安全与环境学报, 2009(5): 104-108. [Jin Chunling, Gong Li. On the urban water security assessment based on the presure-state-response model[J]. Journal of Safety and Environment, 2009(5): 104-108.]

[37] 康绍忠. 西北旱区流域尺度水资源转化规律及其节水调控模式——以甘肃石羊河流域为例[M]. 中国水利水电出版社, 2009. [Kang Shaozhong. Water resources transformation law and water-saving regulation model in northwest arid region: A case study of Shiyang River Basin[M]. China Water Conservancy and Hydropower Press, 2009.]

[38] 陈东景, 徐中民. 西北内陆河流域生态安全评价研究——以黑河流域中游张掖地区为例[J]. 干旱区地理, 2002, 25(3): 219-224. [Chen Dongjing, Xu Zhongmin. Study on assessment of the ecological security in the continental water sheds in northwest China: A case study at the middle reaches of Heihe River watershed, Zhangye Prefecture[J]. Arid Land Geography, 2002, 25(3): 219-224.]

[39] 韩宇平, 阮本清, 解建仓. 多层次多目标模糊优选模型在水安全评价中的应用[J]. 资源科学, 2003, 25(4): 37-42. [Han Yuping, Ruan Benqing, Xie Jiancang. Multi-objective and multilevel fuzzy optimization model and its application in water security evaluation[J]. Resources Science, 2003, 25(4): 37-42.]

[40] 贡力, 刘俊民. 应用模糊综合评价分析方法对兰州市水资源承载力评价研究[J]. 城市道桥与防洪, 2007(7): 147-150, 205-206. [Gong Li, Liu Junmin. Application of fuzzy comprehensive evaluation analysis method to valuate and study water resource bearing capacity in Lanzhou City[J]. Urban Road Bridge and Flood Control, 2007(7): 147-150, 205-206.]

Evaluation of water ecological security in Hexi inland river basin

DAI Wenyuan[1], CHEN Nianlai[1], LI Jinxia[1], ZHANG Rui[2]

(1. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: The Hexi Corridor is located in the middle of China, in the depression between the Tibetan Plateau and the Inner Mongolia Plateau; the Siberian High is unimpeded here. The ecology of the Hexi Corridor directly affects the overall ecological situation of China. Therefore, it is of great practical significance to evaluate water security in the inland river basins of the Hexi Corridor. Most research on water security used the traditional pressure-state-response model and its extended model; the optimization and calibration of an evaluation index system have hardly been mentioned. This article introduces the society-economic-water ecological composite system model for water security evaluation. This water ecological security evaluation index system was constructed from natural and socio-economic attributes of water security, and the index system was optimized by fuzzy system analysis and improved niche theory. The optimized and calibrated index system was used for the fuzzy comprehensive evaluation of the water security of inland river basins in the Hexi Corridor from 2014 to 2017. The improved niche theory was used to calculate the niche width of the evaluation index. The improved niche width values of B3 (industrial added value), B13 (river base flow), B17 (water yield coefficient), and B20 (water diversion) were the largest, which have relatively little influence on the index system. They were eliminated in the optimized index system. Fuzzy system analysis was used to calculate the weight of the evaluation index. In the optimized index system, indexes C11 (perennial average precipitation), C16 (water storage), C17 (surface water supply), C18 (groundwater resource supply), C24 (ecological environment water consumption), and C29 (water-saving irrigation area) have the largest cumulative index weight, at 36.18%. The fuzzy comprehensive evaluation index of water security in the Heihe River Basin was above 0.45. The fuzzy comprehensive evaluation index of the Shiyang River Basin decreased from 0.5 in 2014 to <0.3 in 2017. The fuzzy comprehensive evaluation index of the Shule River Basin hovers around 0.2. The results showed that increasing investment in water conservation, developing water-saving irrigated agriculture, and protecting the ecological environment were the most effective measures to improve water security in inland river basins. From 2014 to 2017, the water security situation in the Heihe River Basin improved, whereas the water security in the Shiyang and Shule River Basins has deteriorated. These basins should be taken as key governance areas, so the trend of the overall improvement and partial deterioration of water security in inland river basins continues. The results provided theoretical and data support for water administration and environmental management departments in the Hexi Corridor to make ecological risk decisions and provided new ideas for the high-quality development of Gansu Province river basins.

Key words: niche improvement theory; fuzzy comprehensive evaluation; water ecological security; Hexi inland river